

листовой штамповки. Расчеты и конструирование, - М: ВНИИНМАШ, Издательство стандартов, 1966. 4. *Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка* /Под общ. ред. Л.И. Рудмана. – М.: Машиностроение, 1988. – 496 с.: ил. – (Б-ка конструктора). 5. L. Fratini, E. Lo Valvo, I. Napoli, D.I. Russo, Ingegnerizzazione di processi di imbutitura di vaschette rettangolari, lamiera, è un mensile tecniche nuove, dicembre, 1997, 77-80. 6. Гун Т.Я. *Пластическое формоизменение металлов* / Т.Я. Гун, П.И. Полухин, В.П. Полухин и др. // М.: Издательство «Металлургия», 1968. – 420 с. 7. *Щипунов Г.И., Дьячков В.Д., Булдаков В.И.*, Кинематика фланца в процессе листовой вытяжки деталей коробчатых форм. – Кузнечно-штамповочное производство, 1971. – №12. 8. *Стеблюк В.І.* Побудова контуру заготовки на основі математичної моделі процесу витягування порожнистих виробів коробчастої форми / Стеблюк В.І., Холявік О.В. // *Обработка материалов давлением* №1 (20), 2009, 63-66. 9. Катков В.Ф. *Оборудование и средства автоматизации и механизации заготовительно-штамповочных цехов: Учебник для авиационных вузов.* М.: Машиностроение, 1985. – 384 с.

Надійшла до редколегії 04.11.2013

УДК УДК 621.983

**Розробка аналітичного методу розрахунку розмірів і форми заготовок для витягування коробчастих виробів / Стеблюк В. І, Холявік О. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №43 (1016). - С.220-228. Библиогр.:11 назв.**

В статье приведен аналитический метод для определения размеров и формы заготовок при вытяжке коробчатых деталей с использованием метода потенциала скорости течения идеальной жидкости. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования подтвердили возможность развития метода определения размеров и формы заготовок при вытяжке коробчатых деталей с использованием метода потенциала скорости течения идеальной жидкости; показали удовлетворительную сходимость результатов, полученных экспериментально и рассчитанных с помощью программ, разработанных на базе соответствующих математических моделей.

**Ключевые слова:** вытяжка, коробчатые детали, моделирование, «обратная» вытяжка, метод потенциалов, оптимальная форма заготовки, расчет заготовки, промежуточные переходы.

In article provides to the improvement of analytical methods for the calculation of the size and shape of blanks in the drawing box-like parts through the use of the method of building. The experimental and theoretical studies have confirmed the possibility of development of methods for determining the size and shape of pieces in the drawing box-like parts through the use of the method of building and showed a satisfactory correlation between the results obtained experimentally and calculated using the programs developed on the basis of the corresponding models.

**Keywords:** extraction, box-type wares, design, «reverse» extraction, «reverse» process, method of potentials, optimum form of preparation, calculation of preparation, intermediate transitions.

УДК 620.179

**Г. М. СУЧКОВ**, докт .техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;  
**С. Н. ГЛОБА**, канд .техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;  
**ЛЕ ЧИ ХИЕУ**, аспирант, НТУ «ХПІ».

## **ВИХРЕТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЯХ**

Разработана модификация компенсированного вихретокового преобразователя (ВТП), обладающего повышенным диапазоном измерений. Выполнены экспериментальные исследования ВТП, которые подтвердили перспективность его применения при контроле толщины диэлектрических покрытий на металлоизделиях.

**Ключевые слова:** толщинометрия, диэлектрическое покрытие, металлоизделие, вихретоковый преобразователь.

**Введение.** Определяющую роль в защите изделий от поражения различными воздействиями являются неэлектропроводные покрытия (краска,

пластик и т.п.), которые наиболее часто применяются не только Украине, но и за рубежом. Подавляющее количество изделий и объектов изготовлено из металлов и требуют применения таких защитных покрытий. Толщины покрытий могут составлять от долей микрон до десятков миллиметров. При этом нанесение излишнего слоя покрытия приводит к ухудшению защитных свойств и существенным материальным потерям. Недостаточный слой покрытия приводит к преждевременному выходу изделий из эксплуатации. Поэтому требуются приборы и методы для контроля толщины неэлектропроводных покрытий на электропроводных изделиях и объектах.

**Актуальность исследования.** Важную роль в области неразрушающего контроля толщины покрытий играет вихретоковый метод [1-3]. Он является традиционным для измерения толщины покрытий на изделиях, поверхностной дефектоскопии, определения физико-механических характеристик электропроводящих материалов и т.п. Приборы для вихретокового контроля достаточно просты в эксплуатации, надежны и не слишком дороги [1]. В то же время показания традиционных вихретоковых устройств существенно зависят от электропроводности и магнитной проницаемости материала изделий. Эти физические величины сложным образом зависят от структуры материала, температуры, наличия механических напряжений, формы поверхности изделий и т.п. Таким образом, имеет место специфика неразрушающего контроля, обусловленная многогранным влиянием мешающих факторов, которые могут привести к существенным ошибкам в оценке качества изделия. Для уменьшения влияния мешающих факторов многие авторы идут по пути усложнения методов контроля (многопараметровые) и соответственно, существенному усложнению и удорожанию вихретоковых приборов [1-2]. В свою очередь, усложнение аппаратуры вихретокового контроля приводит к появлению дополнительных воздействий, обусловленных увеличением количества блоков устройства контроля. Это не позволяет существенно повысить эффективность определения толщины неэлектропроводных покрытий. Упомянутые приборы имеют достаточно узкий диапазон контролируемых толщин. Приходится разрабатывать целые группы приборов, что также удорожает и ограничивает объемы использования вихретокового контроля [3].

Значительные потенциальные преимущества вихретокового контроля толщины покрытий, с одной стороны, недостаточная чувствительность, точность, недостаточная аналитическая обоснованность, с другой, привели к появлению актуальной для промышленности научно-практической задачи. Ее суть заключается в создании нового прибора с трансформаторным компенсационным ВТП, который обеспечит увеличение диапазона контролируемых толщин с дифференциацией чувствительности в разных участках диапазона измерений.

**Основные материалы исследований.** Катушки вихретокового датчики являются важной частью любого индукционного контрольного устройства. Они

могут иметь различную форму. Конструкция и размеры датчиков выбираются на основе условий контроля. Учитываются размеры и форма контролируемого объекта, его однородность и т.д. [2].

Проходные и накладные датчики могут быть одно катушечными или двух катушечными, выполненными по трансформаторной схеме. Иногда используется несколько измерительных катушек, включаемых последовательно или навстречу друг другу. Часто в проходных датчиках для обеспечения равномерности поля катушку возбуждения выполняют из двух последовательно соединенных секций. Измерительную катушку помещают между ними.

Как известно, однородность поля получается посередине между половинами возбуждающей катушки, когда расстояние между этими половинами равно радиусу катушки. Такие системы по принципу действия приближаются к кольцам Гельмгольца.

Проходные датчики, построенные по принципу колец Гельмгольца, позволяют значительно уменьшить влияние вибрации и перемещения контролируемого объекта в вертикальной плоскости. Важной характеристикой является ширина измерительной катушки, поскольку от ее ширины зависит чувствительность прибора [2]. Однако, проходные катушки имеют ограниченное применение из-за малого сортамента симметричных протяженных изделий.

Применяют комбинации из накладных и проходных катушек, например, для обнаружения трещин в стальных шарах используют четыре плоские катушки, расположенные взаимно перпендикулярно. Измерительная кольцевая катушка помещается посередине между ними. Известны проходные системы, в которых образуются вращающиеся или бегущие электромагнитные поля. Еще разнообразнее форма и конструкция накладных датчиков.

При конструировании накладных датчиков для дефектоскопов и толщиномеров традиционно стремятся к уменьшению их диаметра. Однако, это приводит к увеличению чувствительности в отношении локальных участков с неоднородностью магнитной проницаемости и электропроводности материала изделия.

Применяют однокатушечные и двухкатушечные датчики, а иногда и датчики с несколькими измерительными катушками разного диаметра [1-2]. На очень высоких частотах применяют спиральные катушки, намотанные в виде часовой спиральной пружины. Накладные катушки и датчики выполняют по форме зуба шестерни, вытянутыми в длину в виде узкого прямоугольника или эллипса, согнутыми по форме цилиндрической детали и др.

При конструировании накладных и экранных датчиков учитывают, что на расстоянии, приблизительно равном 10 радиусам катушки, ее поле почти полностью затухает. В катушках, длина которой в 5 раз и более превышает радиус, верхняя часть витков практически не участвует в создании возбуждающего электромагнитного поля. Плоские катушки большого диаметра дают лучшие результаты, чем высокие катушки малого диаметра. Диаметр катушек с ферритовыми сердечниками, как правило, превышает диаметр

сердечников не более чем в 2-3 раза. Однако, преобразователи с ферритовыми сердечниками являются существенно температурозависимыми [1-2]. Для уменьшения влияния температуры эффективные двухкатушечные вихретоковые датчики включаются по компенсационной схеме. С той же целью возбуждающие индукторы ВТП мотают проводом с высоким активным сопротивлением. Для работы в горячих средах в качестве основы индукторов используют сердечники из кварца, керамики или выполняют из охлаждаемых медных трубок. Таким образом, для решения задачи расширения контролируемых диапазонов толщин покрытий необходимо изготавливать ВТП трансформаторного типа с компенсацией влияния зондирующего поля на принимаемый сигнал. Датчик не должен содержать температурозависимых сердечников. Должно быть исключено влияние фазовых искажений при компенсации влияния возбуждающего поля. Поэтому предпочтительно использовать для регистрации амплитуды полезного сигнала одну катушку.

Для решения поставленной задачи предложен трансформаторный компенсированный вихретоковый преобразователь, схематическая конструкция которого показана на рис. 1. Возбуждающая катушка 1 выполнена проводниками, лежащими в одной плоскости. Аналогично выполнена приемная катушка 2. Относительно друг друга приемная 1 и возбуждающая 2 катушки расположены так, что плоскости, в которых они лежат, взаимно перпендикулярны. При таком расположении катушек ток  $I = I_0 \sin \omega t$ , проходящий через проводники возбуждающей катушки 1 не будет возбуждать в приемной катушке 2 э.д.с.

Следовательно, полезный сигнал будет выделяться не на фоне мощного возбуждающего сигнала. Если при изготовлении вихретокового преобразователя не удалось полностью скомпенсировать «наводку» от возбуждающего сигнала, то достаточно незначительно сместить проводники приемной или возбуждающей катушек относительно друг друга, добившись, таким образом, полной компенсации амплитуды наводки. При этом фаза сигнала может меняться, но влиять на пиковое значение амплитуды полезного сигнала не будет. Разработанные модификации макетов ВТП для контроля толщины покрытий приведены на рис.2.

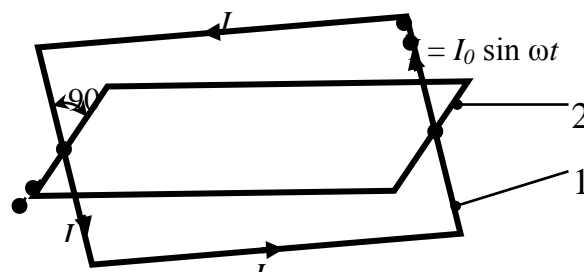


Рис. 1 – Взаимное расположение возбуждающей и приемной катушек трансформаторного компенсированного ВТП



Рис.2. – Модификации компенсированных трансформаторных ВТП для контроля толщины покрытий

Перед проведением контроля проводится предварительная калибровка прибора на образце изделия, изготовленного из того же материала, что и контролируемый объект и имеющего такую же форму поверхности. Первичное измерение амплитуды принятого сигнала проводят без наличия модели покрытия. Полученное значение амплитуды запоминают. Затем помещают на поверхность изделия последовательно неэлектропроводные прокладки различной толщины и запоминают соответствующую последовательность принятых амплитуд. Диапазон толщин калибровочных прокладок должен перекрывать возможный диапазон толщин покрытий, установленный нормативно-технической документацией на контроль.

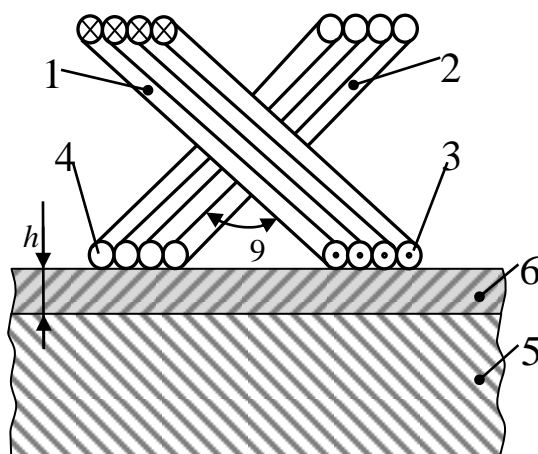


Рис.3 – Принцип работы компенсированного ВТП

Работает устройство следующим образом, рис. 3. Преобразователь помещается на поверхность покрытия таким образом, что рабочие участки 3 и 4 возбуждающей катушки 1 и приемной катушки 2 соответственно обращены к изделию 5. В возбуждающей катушке 1 инициируют высокочастотный ток  $I = I_0 \sin \omega t$  (или импульсный ток с заданными характеристиками). В поверхностном слое изделия 5 под покрытием 6 толщиной  $h$  формируется вихревой ток.

Взаимодействие возбуждающего электромагнитного поля и электромагнитного поля созданного вихревым током приводит к возбуждению в приемной катушке 2 Э.Д.С., амплитуда которой зависит от толщины покрытия  $b$ . Сравнивая полученное значение амплитуды с калибровочной зависимостью, определяют толщину  $h$  покрытия. Переносят вихретоковый преобразователь на другую точку поверхности изделия и повторяют контроль. Таким образом, путем сканирования выполняется контроль толщины покрытия на всей поверхности изделия.

Для проверки работоспособности разработанного преобразователя выполнены экспериментальные исследования с помощью стенда, блок-схема которого приведена на рис.4. Стенд содержит блок управления и регистрации, генератор, объект контроля (ОК), вихретоковый преобразователь ВТП с катушкой возбуждения  $W_b$  и регистрирующей катушкой  $W_p$ , усилитель УС и устройство отображения информации. Для исследований использованы ВТП различных размеров (см. рис.2) с возможностью их настройки на различную частоту. Экспериментальные исследования показали, что рациональным, с точки зрения получения максимального отношения амплитуды принятого сигнала и шума, является частотный диапазон  $0,1 \dots 1$  МГц. Больше отношение сигнал-шум получается при более низких частотах из указанного диапазона.

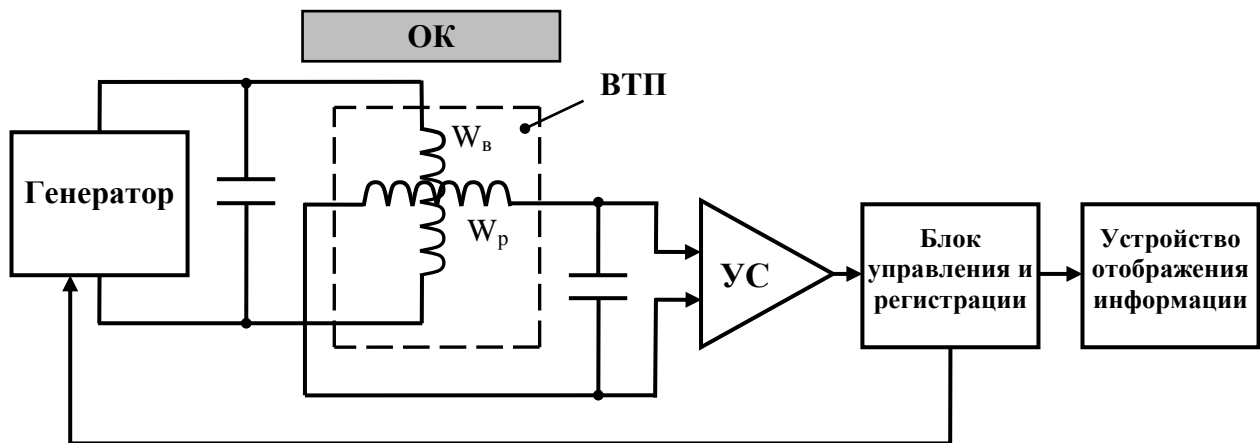


Рис.4 – Блок-схема стенда для исследований компенсированных ВТП

Для выполнения экспериментальных исследований использованы плоские образцы из стали ст.20, свинца, алюминия, нержавеющей стали, сталей 09Г2С, У7, трубной, ШХ-15, спецсплава с памятью формы, меди. Моделями покрытий служили пластинки из стеклотекстолита различной толщины. Точное значение толщины пластин определялась с помощью микрометра. Питающее гармоническое напряжение формировалось генератором с частотой 220 кГц. Ток в возбуждающей катушке поддерживался равным 90 мА. В таблице приведены полученные результаты.

Таблица. Зависимость амплитуды полезного сигнала и шума на приемной катушке ВТП от толщины модели неэлектропроводного покрытия на основаниях из различных материалов

h, мм	Сви- нец, В	Сталь ст.20, В	Сталь ШХ-15, В	Алю- миний, В	Нерж. сталь, В	Ла- тунь, В	Труб- ная сталь, В	Сталь 09Г2С, В	Спец. сплав, В	Сталь У7, В	Медь, В
0,00	17,0	10,0	9,00	21,00	14,0	18,5	7,60	9,00	10,0	9,00	21,5
0,09	16,0	9,00	8,50	20,00	13,5	18,5	7,20	7,50	9,50	8,00	20,0
0,16	15,5	9,00	8,00	19,00	12,0	17,5	6,60	7,20	9,25	8,00	18,5
0,20	15,0	9,00	8,00	19,00	12,0	17,5	6,40	6,80	9,00	7,00	18,0
0,22	15,0	8,00	7,80	17,10	11,5	16,0	6,20	6,60	7,80	7,00	17,5
0,32	13,0	7,00	6,80	16,00	10,5	15,0	5,80	6,60	7,60	7,00	15,0
0,46	13,0	7,00	6,80	16,00	10,5	14,5	5,80	5,80	7,60	7,00	15,0
0,51	12,5	7,00	6,50	15,50	10,0	14,0	5,40	5,80	7,00	6,50	14,5
0,60	12,0	6,50	6,00	14,00	9,00	13,0	5,00	5,00	6,80	6,00	12,5
0,79	11,0	6,50	6,00	14,00	9,00	12,0	5,00	5,00	6,60	6,00	11,5
0,80	10,0	6,00	5,00	14,00	8,25	11,0	4,20	4,40	6,00	5,00	10,5
0,92	10,0	6,00	5,00	12,50	8,20	11,0	4,20	4,40	6,00	5,00	5,80
1,41	7,00	5,00	4,90	9,50	6,80	10,0	3,65	3,70	5,40	4,50	5,00
1,44	7,00	4,00	4,00	9,00	6,50	7,70	3,10	3,15	4,60	4,00	4,20
2,00	5,00	3,50	3,00	6,00	4,20	5,20	1,95	2,20	3,30	3,00	3,30
2,34	4,50	3,00	3,00	4,80	3,60	4,20	1,95	1,75	2,80	3,00	2,90
2,59	3,00	2,50	2,50	4,00	2,75	3,35	1,45	1,40	2,35	2,00	2,90
3,80	3,00	2,00	2,00	1,90	1,60	1,85	0,85	0,83	1,35	2,00	1,50
4,00	2,00	2,00	2,00	1,60	1,23	1,40	0,65	0,65	1,10	2,00	1,00
4,47	2,00	1,50	1,50	1,15	0,93	1,13	0,54	0,48	0,85	1,00	0,76
5,14	2,00	1,50	1,50	0,95	0,80	0,90	0,48	0,44	0,74	1,00	0,64
5,16	1,00	1,50	0,50	0,90	0,68	0,75	0,43	0,36	0,68	1,00	0,54
9,21	0,16	0,10	0,08	0,16	0,14	0,15	0,09	0,06	0,17	0,08	0,13
10,17	0,12	0,09	0,05	0,10	0,09	0,11	0,05	0,04	0,12	0,08	0,08

**Выводы.** Анализ результатов приведенных в таблице позволяет сделать ряд выводов:

1. Свойства материала подложки существенно влияют на результат контроля. Причем это влияние различное при различных толщинах покрытия. Оно наибольшее при малых толщинах покрытия и уменьшается по мере увеличения его толщины.

2. При подготовке к проведению контроля необходимо калибровать прибор для измерения толщины покрытия на образце из того же материала, что и контролируемый объект с учетом его формы.

3. Чувствительность разработанного преобразователя максимальна при малых значениях толщины покрытия и плавно уменьшается с увеличением толщины покрытия.

4. Установлено, что разработанный тип преобразователя позволяет расширить диапазон контролируемых толщин покрытий.

**Список литературы:** 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Книга 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. 2. *Потапов А.И., Сясько В.А.* Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / Научное, методическое, справочное пособие. – Санкт-Петербург: СПб, 2009. – 904 с. 3. *Валитов А.М.-З., Шилов Г.И.* Приборы и методы контроля толщины покрытий. – М.: Машиностроение, 1970. – 120 с.

*Надійшла до редколегії 24.11.2013*

УДК 620.179

**Вихретоковый преобразователь для контроля толщины диэлектрических покрытий на металлоизделиях / Сучков Г. М., Глоба С. Н., Ле Чи Хиеу // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №43 (1016). - С.228-235. Библиогр.:11 назв.3**

Розроблено модифікацію компенсованого вихрострумowego перетворювача (ВТП), що має підвищений діапазон вимірювань. Виконано експериментальні дослідження ВТП, які підтвердили перспективність його застосування при контролі товщини діелектричних покриттів на металовиробах.

**Ключові слова:** толщинометрія, діелектричне покриття, металовиріб, вихрострумний перетворювач.

The modification of the compensated eddy current probe (ECP) has been developed, which has a high range of measurement. Experimental researches of ECP performed, which confirmed the promise of its application in the control the thickness of the dielectric coatings on the metal products.

**Keywords:** thickness-measurement, dielectric coating, metal product, eddy current probe.